小型氟盐冷却高温堆负荷跟踪运行能力分析

吕鑫狄，张大林*，李新宇，秋穗正，苏光辉
(西安交通大学 核科学与技术学院，陕西 西安 710049)

摘要 为推动“一带一路”共建国家能源合作需求多元化发展，解决新丝绸之路经济带沿线上安全、高效的能源供应需求，提出了固有安全一体化小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 设计方案。为验证 FuSTAR 反应堆自身负荷跟踪运行的能力以及其安全性，对 FuSTAR 系统进行了详细的热工水力和控制系统的建模计算，并深入分析了其抗干扰特性和负荷运行跟踪能力。在不依赖外部控制系统的情况下，小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 展现出了一定的负荷跟踪能力，这主要归功于其具有固有安全特性，使得反应堆能够在负荷变化下实现自我稳定与调节。在采用冷却剂出口温度恒定控制方案后，FuSTAR 的核反应堆负荷跟踪能力得到了进一步增强，在 10%FP 负荷阶跃变化以及 5%FP/min 速率线性升降负荷的测试中，核反应堆功率的超调量均严格控制在 5%以内，充分满足了反应堆安全运行的要求。

关键词 氟盐冷却高温堆；负荷跟踪；热工水力；控制
中图分类号 TL426
DOI:

Analysis of Load Tracking Capability for Small Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Advanced Reactor

LV Xindi，ZHANG Dalin *，LI Xinyu，QIU Suizheng，SU Guanghui
(*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi’an 710049, China y*)

Abstract **[Background]**: In pursuit of promoting the diversified development of energy cooperation demands among countries participating in the Belt and Road Initiative and address the demand for secure and efficient energy supply along the Belt and Road Economic Belt, Xi'an Jiaotong University has actively innovated and proposed a small modular fluoride-salt-cooled high-temperature advanced reactor FuSTAR. **[Purpose]**: Although the conceptual design of FuSTAR has been completed, the reactor's ability to operate with load tracking and its safety are still need to be verified. **[Methods]**: The FuSTAR system was modeled and calculated by using VITARS software for detailed thermal-hydraulic and control system modeling, and its anti-interference characteristics and load operation tracking capability were analyzed in depth. **[Results]**: FuSTAR has demonstrated load tracking capability without relying on an external control system, mainly due to its inherent safety features, which allow the reactor to self-stabilize and regulate under load variations. With the adoption of a constant coolant outlet temperature control scheme, the load

---

国家重点研发计划(2020YFB1902000)资助
第一作者：吕鑫狄，男，1994 年出生，2020 年于哈尔滨工程大学获硕士学位，现为西安交通大学核科学与技术专业在读博士研究生，研究领域为先进核能系统热工水力与控制技术
通讯作者：张大林，E-mail：dlzhang@mail.xjtu.edu.cn
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00
Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1902000)
First author: LV Xindi, female, born in 1994, graduated from Harbin Engineering University with a master's degree in 2020, doctoral student in nuclear science and technology at Xi’an Jiaotong University, focusing on the thermal hydraulics and control of advanced nuclear system
Corresponding author: ZHANG Dalin, E-mail: dlzhang@mail.xjtu.edu.cn
Received date: 20XX-00-00, revised date: 20XX-00-00

tracking capability of FuSTAR has been further enhanced. In the tests of 10% FP load step change and 5% FP/min rate linear load rise and fall, the overshoot of nuclear reactor power is strictly controlled within 5%. **[Conclusions]**: Because of the negative temperature reactivity feedback and the existence of control system, the small fluoride-salt-cooled high-temperature reactor has a good load tracking ability, which fully meets the requirements of safe operation of the reactor.

Key words Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor; Load tracking; Thermal hydraulics; Control

随着全球持续推进碳中和行动计划，国际市场对新能源的需求日益高涨。世界各国正在持续深挖核能发展潜力，加快构建新型能源体系，目前第四代核电技术的研发和应用步入新的阶段[1]。氟盐冷却高温堆（FHR）是一种集成多种四代堆优势并且兼顾体积、重量、性能和安全的无水冷却反应堆方案[2]。氟盐冷却高温堆的概念最早由橡树岭国家实验室提出，它采用液态氟盐作为反应堆的冷却剂。与液态熔盐堆（MSR）不同的是，其不在使用溶解于高温氟盐中的液态核燃料，而是使用高温气冷堆中的固定核燃料。此外，液态金属冷却反应堆中常用的非能动余热排出系统被应用在氟盐冷却高温堆上。因此，它具有相当大的研究前景。

此后二十几年的时间，对于 FHR 的研究进入了蓬勃发展的阶段，UCB、ORNL、MIT、SINAP 等机构提出了一系列不同结构和功率的氟盐冷却高温堆，包括 AHTR[3]、PB-AHTR[4]、SmAHTR[5]、TMSR-SF[6]、Mk1 PB-FHR[7]、TFHR[8]等。为解决新丝绸之路经济带沿线上安全、高效的能源供应需求，西安交通大学提出了固有安全一体化小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR[9,10]，虽然其目前已经完成了其概念设计，但是反应堆自身负荷跟踪运行的能力以及其安全性还有待验证。此外，目前的反应堆负荷跟踪研究多集中于压水堆，对小型模块化反应堆特别是氟盐堆的负荷运行能力分析较少，因此有必要对小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 系统的设计方案和运行能力进行评价。

本文首先对小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 进行热工水力建模，分析其在反应性扰动和负荷变化作用下的响应能力和安全性，然后对 FuSTAR 建立冷却剂出口温度恒定控制系统，并对其进行了负荷变化下的工况计算，验证控制策略的正确性和 FuSTAR 系统的负荷运行跟踪能力。

1 小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 简介

为深化“一带一路”倡议下共建国家的能源合作，推动其多元化发展需求，并有效应对新丝绸之路经济带沿线地区对于安全、高效能源供应的迫切需求，西安交通大学在国家重点研发计划项目的支持下，积极创新，提出了固有安全一体化小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR，FuSTAR 的整体设计如图 1 所示，其主要结构包括核反应堆系统、能量转换系统、冷却系统、非能动余热排出系统、控制棒系统、核燃料循环系统、熔盐储热系统和安全壳等。

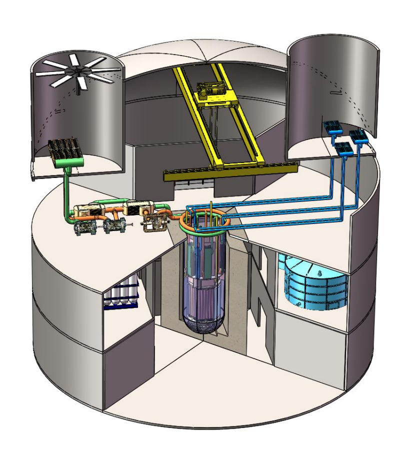


图 1 FuSTAR 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the FuSTAR system

其中，FuSTAR 核反应堆系统的详细设计结构如下图 2 所示，堆芯共装载 91 盒组件，包含 15%富集度 ^{235}U 燃料组件盒、17.5%富集度 ^{235}U 燃料组件盒、调节棒组件盒和安全棒组件盒，堆芯组件的径向和轴向功率分布如图 3 所示，堆芯燃料换料周期为 3.24 年，平均燃耗深度为 106 GWd/MtU[11]。堆芯活性区采用石墨作为慢化剂，液态熔盐 FLiBe 作为冷却剂，堆芯热功率为 125 MW，堆芯出口温度可达 700 ℃。在堆芯上方热池围板外配有 6 个印刷板路式换热器[12]，其中 3 个作为常用的主换热器，另外 3 个用作冗余设计，换热器下方装有高速轴流泵用于驱动堆内冷却剂强迫循环。同时，在主换热器旁还配备 3 个非能动余热排出换热器，用于导出停堆后的堆芯剩余衰变热[13]。

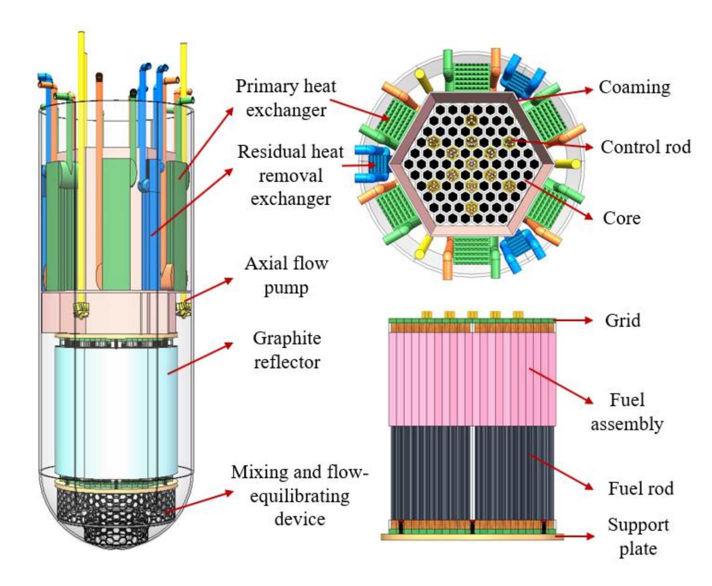
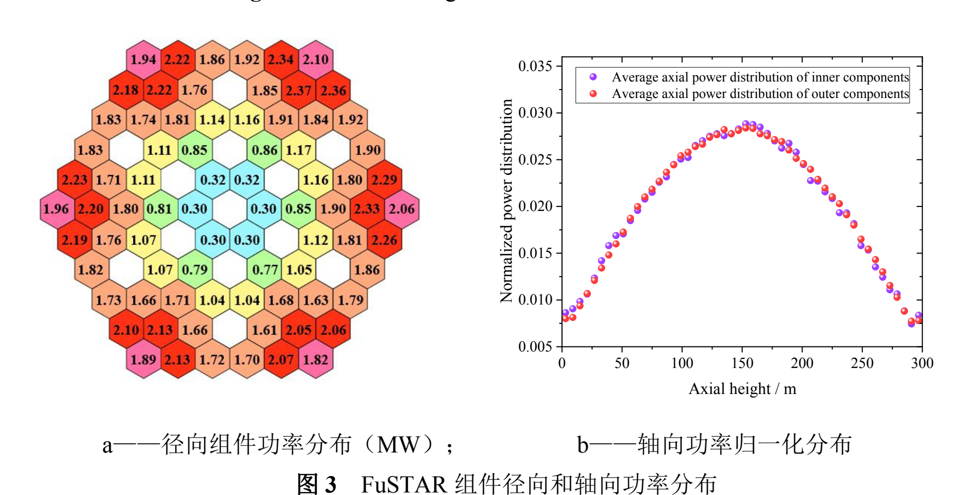


图 2　FuSTAR 堆本体系统示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the FuSTAR reactor vessel



a——径向组件功率分布（MW）；　　　　b——轴向功率归一化分布

图 3　FuSTAR 组件径向和轴向功率分布

Fig. 3　Radial and axial power distribution of FuSTAR components

FuSTAR 的总体设计参数如表 1 所示，当反应堆正常运行时，冷却剂从堆芯底部由下往上流动，进入上腔室后，由轴流泵驱动进入主换热器进行冷却换热，随后流过下降环腔后进入下腔室，在下腔室进行流量分配后重新流入堆芯。在堆本体系统内的冷却剂压力接近大气压，堆芯和主要部件都包含在反应堆压力容器内部，同时堆芯设计具有较大的负反应性反馈系数，加上配备非能动的余热排出系统，保证反应堆系统的安全性和可靠性，因此其具备较好的固有安全性。

表 1 FuSTAR 总体参数

Table 1 FuSTAR overall parameters

参数 Parameter	值 Value
热功率 Power /MW	125
运行压力 Pressure /MPa	~0.1
进出口温度 Inlet and outlet temperature /℃	650/700
堆本体冷却剂 Reactor vessel coolant	FLiBe
燃料 Fuel	HCF 燃料（TRISO）
慢化剂 Moderator	石墨
包壳 Cladding	C-C 复合材料
燃料多普勒系数 Fuel doppler coefficient /pcm·K^{-1}	-3.23
冷却剂温度反馈系数 Coolant temperature feedback coefficient / pcm·K^{-1}	-0.21
慢化剂温度反馈系数 Moderator temperature feedback coefficient / pcm·K^{-1}	-0.12
堆芯冷却方式 Core cooling method	强迫循环
堆芯流量 Core mass flow rate /kg·s^{-1}	1050
堆芯高度 Core height /m	3
余排系统冷却剂 Coolant for residual heat removal system	FLiNaK
能量转换系统冷却剂 Coolant for energy conversion system	SCO_2
换热器 Heat exchanger	PCHE
换热器材料 Heat exchanger material	Hastelloy-N

2 FuSTAR 系统建模过程

可视化交互式核动力系统模拟平台 VITARS[14]是由西安交通大学开发的核反应堆系统一体化仿真软件，其内置有 RELAP 程序可用于一维热流体仿真计算，程序已添加熔盐的热物理性质和流动传热关系式并通过验证[15,16]，具备模拟小型氟盐冷却高温堆热工水力的能力。同时，VITARS 还开发了一套逻辑控制计算系统，用于实现核反应堆系统的运行控制。

2.1 FuSTAR 热工水力建模

VITARS 采用模块化建模方式对核反应堆系统进行建模，通过 VITARS 对 FuSTAR 的堆本体系统和余热排出系统进行建模，如下图 4 所示，主要包括堆芯活性区、上腔室、FLiBe-SCO2 主换热器、轴流泵、下降环路、下腔室、FLiBe-FLiNaK 堆内余排换热器、FLiNaK-Air 堆外余排换热器和管道等设备，其中堆芯活性区被划分为三个并联通道：内区燃料通道、外区燃料通道和最热通道。二回路采用边界条件建模，可以通过改变 FLiBe-SCO2 主换热器二次侧入口的流量和温度来获得 FuSTAR 的负荷需求变化。

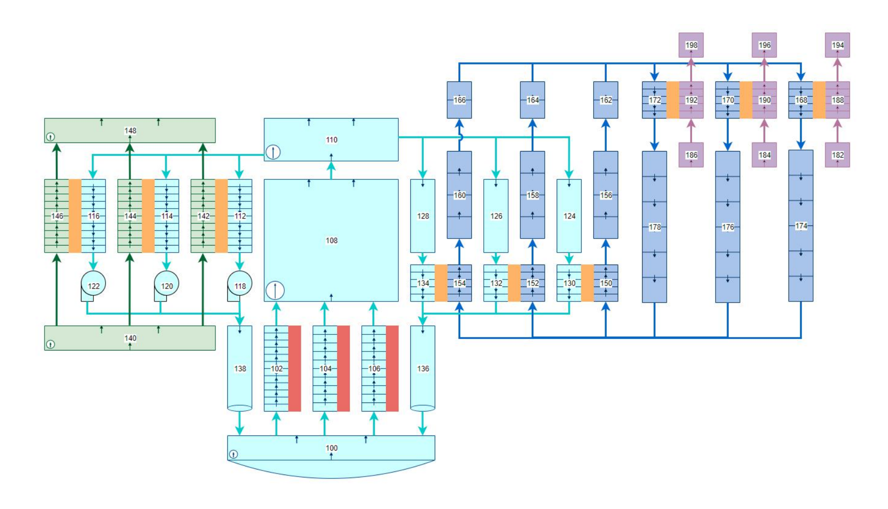


图 4 FuSTAR 热工水力系统 VITARS 建模图

Fig. 4 VITARS modeling diagram of FuSTAR thermal hydraulic system

2.2 FuSTAR 控制系统建模

FuSTAR 需要 700 ℃以上的堆芯出口温度来为高温工艺热系统提供稳定的能量源，但是由于堆内换热器的结构材料采用的是 Hastelloy-N，其在长期使用下的最高工作温度为 730 ℃[17]，为避免堆芯出口冷却剂温度的上升对换热器结构热应力等的影响，将采用冷却剂出口温度恒定方案[18,19]，在这种方案下，FuSTAR 堆芯出口的冷却剂温度稳定在 700 ℃，不随负荷的改变而变化。

在 FuSTAR 控制系统的逻辑如下图 5 所示，从热工水力程序计算得到堆芯出口温度测量值与堆芯出口温度设定值的偏差，经过 PI 控制器产生控制信号调节控制棒的移动，从而引入反应性再反馈给热工水力程序。同时，将负荷功率设定值与热工水力程序计算得到的功率测量值的偏差通过比例控制器调节，作为功率控制器的前馈部分，提高功率调节的速率。此外，通过参数整定得到相应比例积分控制器和比例控制器的控制参数。

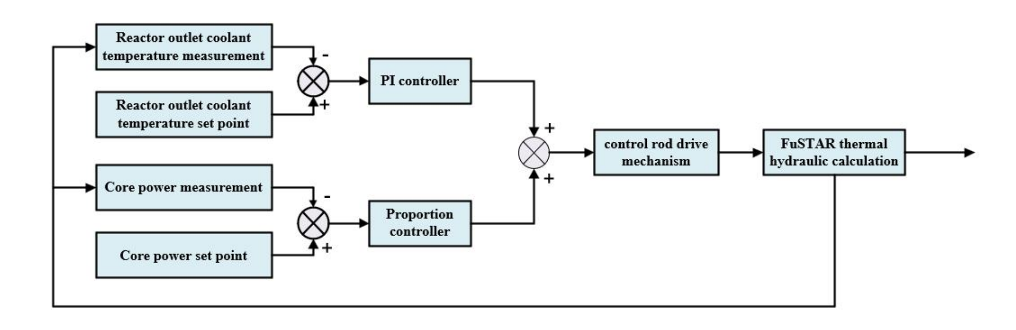


图 5 FuSTAR 控制系统逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of FuSTAR control system

3 结果和讨论

3.1 FuSTAR 反应性引入扰动特性分析

3.1.1无控制系统下的反应性扰动响应

小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 具有负的温度反馈系数，具有一定的自稳性，假设在反应堆稳定运行 1500 s 时阶跃引入 0.05 $大小的反应性，同时二回路的负荷需求没有发生变化，分析 FuSTAR 对反应性扰动的响应情况。从图 6 中可以看出，当堆芯发生反应性扰动而引入 0.05 $正反应性之后，堆芯功率迅速上升，最高到达 141.9 MW，功率的上升引起堆芯出入口及燃料温度的上升，因为堆芯具有负的燃料温度反馈系数

和冷却剂温度反馈系数，在负反应性反馈的作用下，堆芯引入负的反应性，堆芯功率开始下降，因为负荷没有发生变化，最终堆芯功率回到 125MW，但是堆芯整体温度的上升导致最终堆芯出口与稳态设计值产生 10 K 左右的温度偏差。

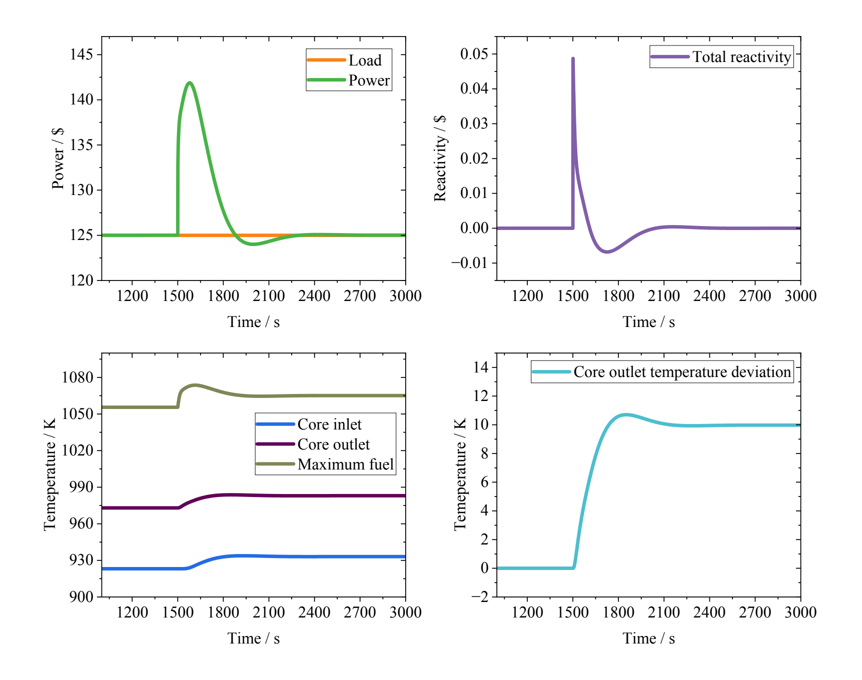


图 6 无控制系统下的 FuSTAR 反应性扰动响应
Fig.6 FuSTAR reactivity disturbance response in uncontrolled system

3.1.2有控制系统下的反应性扰动响应

当控制系统生效时候，再发生 0.05 $大小的反应性扰动后，堆芯功率同样受到正反应性的引入而增加，但是在负反应性反馈和控制系统的共同作用下，堆芯更快地回到与负荷相匹配的满功率水平，如图 7 所示。同时，堆芯出口温度在略微上升 1.5 K 后，很快回到设定的 973 K 的水平线，于此同时，燃料峰值温度相比于无控制系统时候也更低一些。控制系统的存在，使得反应堆系统抗干扰能力更强，同时让堆芯出口温度稳定在 973 K 左右，从而更加安全稳定地为高温工艺热系统输出热量。

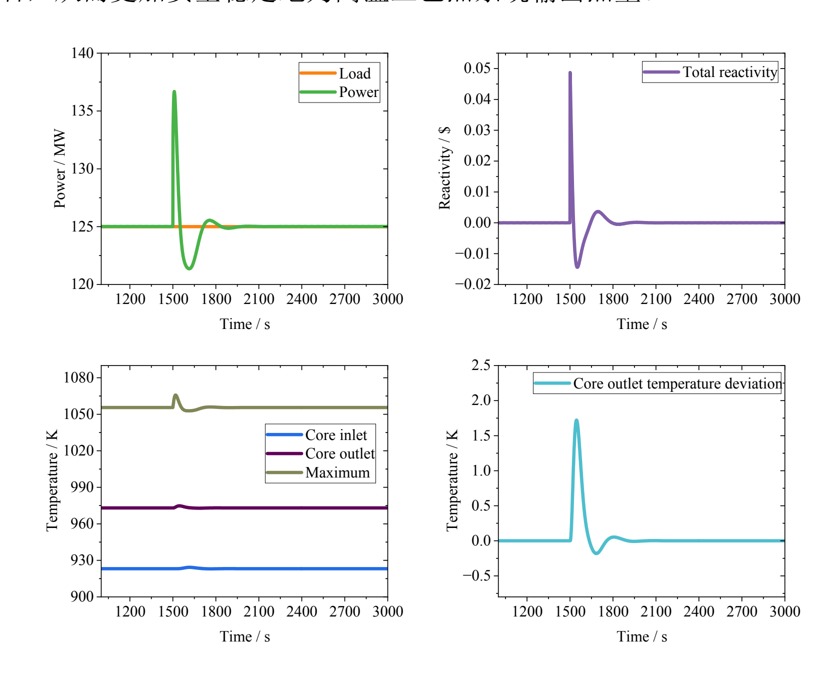


图 7 有控制系统下的 FuSTAR 反应性扰动响应
Fig.7 FuSTAR reactivity disturbance response under controlled system

3.2　FuSTAR 负荷跟踪特性分析

3.2.1无控制系统下的负荷跟踪特性

包括核电站在内的核反应堆系统允许负荷最大可有±10%的阶跃变化[20]，因此首先通过100%-90%-100%FP 和 20%-30%-20%FP 的阶跃功率变化来分析 FuSTAR 系统的负荷跟踪能力，图 8 和图 9 分别给出了高功率水平下（125MW-112.5MW-125MW）和低功率水平（25MW-37.5MW-25MW）下，FuSTAR 系统对 10%FP 阶跃变化的响应过程。从图中可以看出，在高功率和低功率水平下，当主换热器二次侧的负荷发生阶跃变化时，FuSTAR 在负的温度反应性反馈作用下，堆芯功率会逐渐稳定到与负荷相匹配的水平线。不过在这个过程中，堆芯出口的温度会随负荷的改变而发生变化，这对于堆内结构材料的稳定是不利的。同时，调节反应堆功率的响应时间过长，响应幅度过大，这对反应堆的安全性也会造成影响。

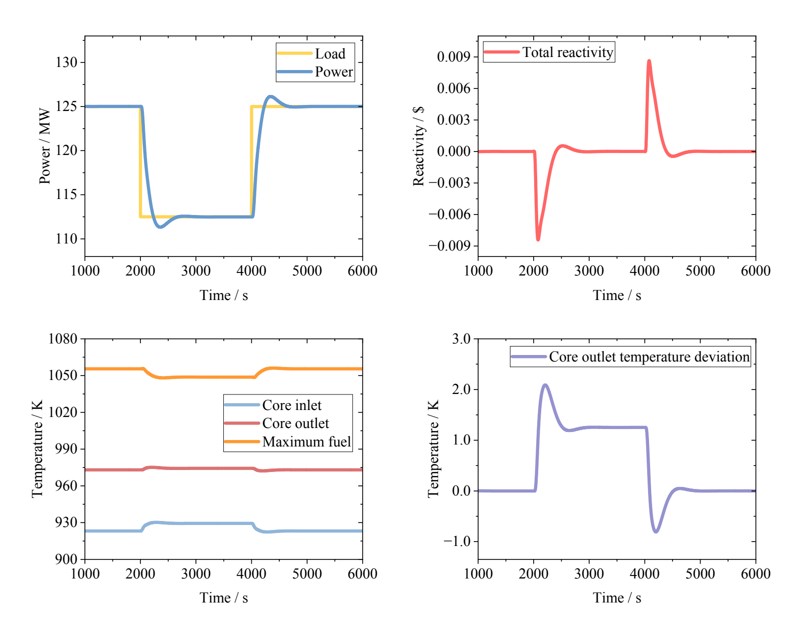


图 8　无控制系统高功率水平下的 FuSTAR 负荷跟踪特性
Fig.8　FuSTAR load tracking characteristics for high power level in uncontrolled system

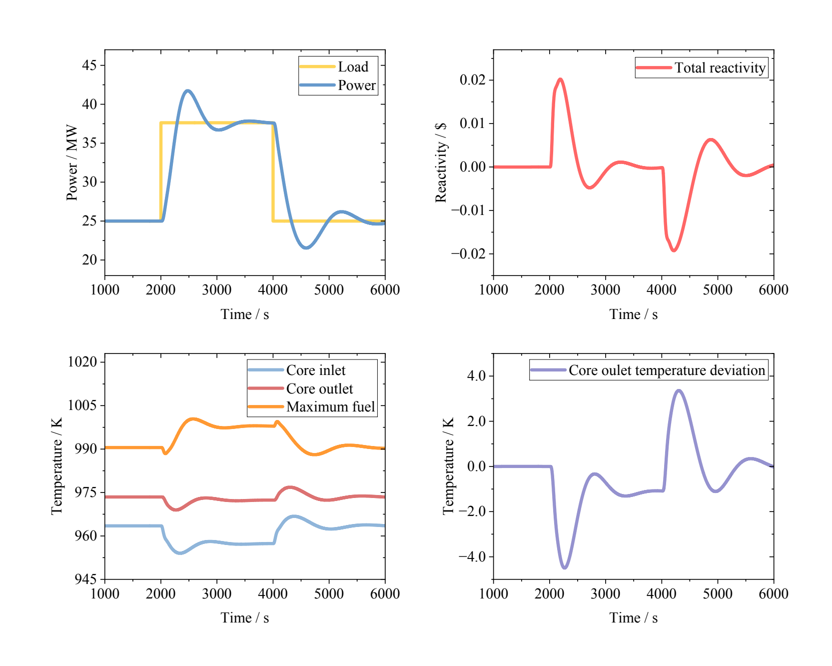


图 9　无控制系统低功率水平下的 FuSTAR 负荷跟踪特性
Fig.9　FuSTAR load tracking characteristics for low power level in uncontrolled system

3.2.2有控制系统下的负荷跟踪特性

因此，通过对 FuSTAR 构建控制系统来提高反应堆的负荷跟踪能力，图 10 和图 11 分别给出了高功率水平下（125MW-112.5MW-125MW）和低功率水平（25MW-37.5MW-25MW）下，FuSTAR 系统对 10%FP 的阶跃功率变化响应情况。对比图 10 和图 8、图 11 和图 9 可以看出，控制系统的加入，使得反应堆功率在应对负荷改变时，得到更快更小幅度的调节。同时，堆芯出口温度只有在阶跃的时候有小幅度的调节，其他时间一直稳定的维持在 973 K 的水平线上。

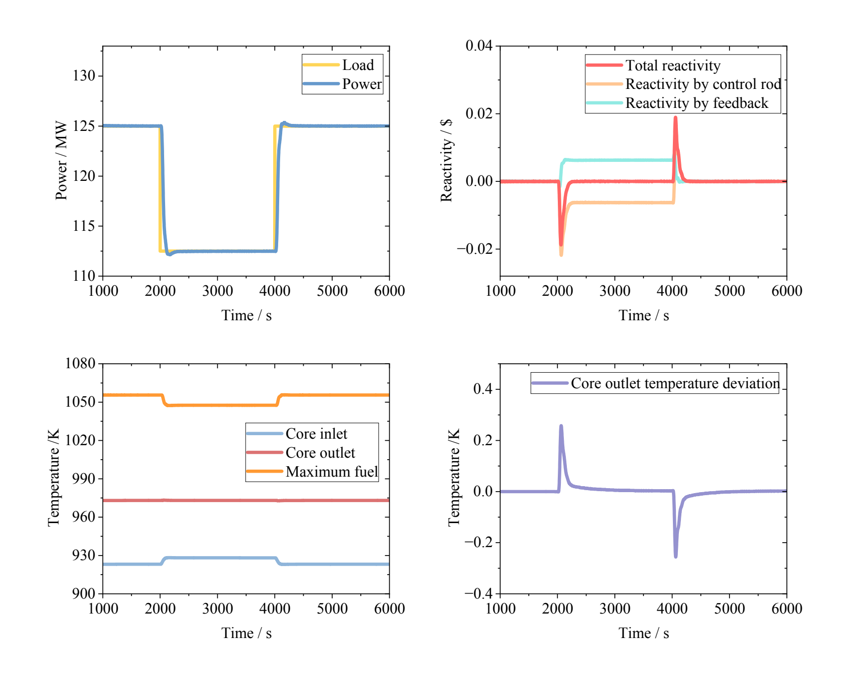


图 10　有控制系统高功率水平下的 FuSTAR 负荷跟踪特性
Fig.10　FuSTAR load tracking characteristics for high power level under controlled system

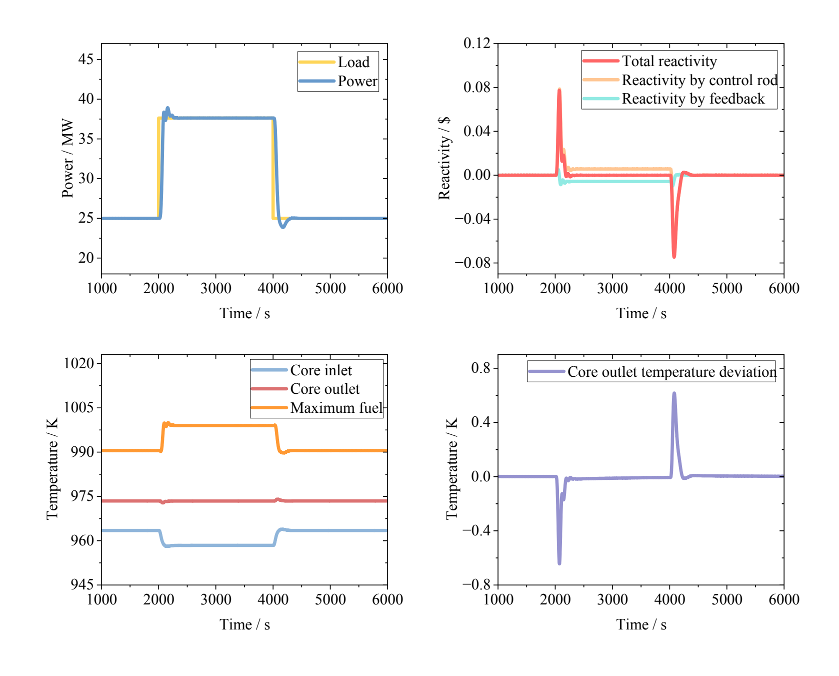


图 11　有控制系统低功率水平下的 FuSTAR 负荷跟踪特性
Fig.11　FuSTAR load tracking characteristics for low power level under controlled system

表 2 给出了 FuSTAR 在没有控制系统和有控制系统下，进行 10%FP 负荷阶跃过程中的反应堆功率的超调量和调节时间对比情况，从表中可以看出，加上控制系统之后，超调量变为原来的 1/3 左右，在高功率

水平下和低功率水平下都不超过 5%，功率调节时间在高功率水平下和低功率水平下分别缩短为原来的 1/2 和 1/5 左右，控制系统的存在，极大的减小了功率的超调量和调节时间，使得 FuSTAR 堆芯核功率能够更加快速、安全的匹配热负荷的变化。

表 2　不同工况下 FuSTAR 超调量和超调时间对比
Table 2　不同工况下 FuSTAR 超调量和超调时间对比

工况 Working condition	有无控制系统 Availability of control system	功率超调量 Power overshoot / %	功率调节时间 Power adjustment time / s
100%FP – 90%FP	无控制	0.94	680
	有控制	0.31	342
90%FP – 100%FP	无控制	0.91	672
	有控制	0.29	315
20%FP – 30%FP	无控制	11.28	1379
	有控制	3.80	279
30%FP – 20%FP	无控制	13.84	1612
	有控制	4.55	312

图 12 给出了 FuSTAR 反应堆稳定运行 2000s 后，在 600 s 内从满功率 125 MW 以 5%FP/min 的速率降到 62.5MW，然后运行 2000 s 后，在 600 s 内从 50%功率以 5%FP/min 的速率升到 100%满功率的过程。从图中可以看出，FuSTAR 系统通过依靠负反应性反馈作用，自身具有一定的负荷跟踪能力，但是其调节过程较慢且调节时间偏长，同时堆芯出口温度在负荷变化过程中也不稳定。加上控制系统之后，反应堆的调节能力变得更强，能够更好的应对负荷变化，并且在功率变化过程中，可以维持稳定的反应堆出口温度，从而更好的保护反应堆内系统设备和更加稳定的为高温工艺热系统提供热量。

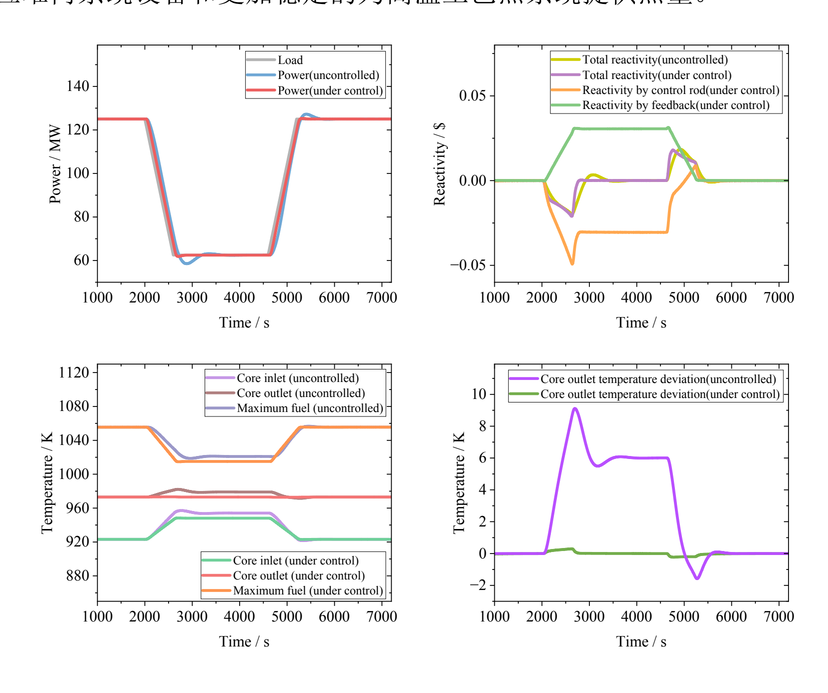


图 12　负荷线性升降测试下的关键参数响应
Fig.12　Response of key parameters under linear rise and fall tests of load

4　结语

本文通过 VITARS 软件对小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 进行了热工水力和控制系统的建模计算，对 FuSTAR 的负荷运行特性进行了分析。

（1）小型氟盐冷却高温堆 FuSTAR 在不依靠控制系统的情况下具有负荷跟踪的能力，其通过自身的

固有安全特性，能够自稳自调，使得反应堆功率与负荷达到一致水平。

（2）FuSTAR 在应用冷却剂出口温度恒定控制方案后，核反应堆负荷跟踪的能力相比于没有控制系统的情况下变得更强，在 10%FP 负荷阶跃变化和 5%FP/min 速率线性升降负荷的过程中，核反应堆功率的超调量都不超过 5%，满足反应堆的安全运行要求。

作者贡献声明 吕鑫狄负责建模、文章初稿撰写；张大林负责方法调研、指导；李新宇负责数据处理；秋穗正负责修改文章；苏光辉负责对文章内容进行批判性审阅。

参考文献

1 王丛林, 柴晓明, 杨博, 等. 先进核能技术发展及展望[J]. 核动力工程, 2023, 44(5): 1-5.

2 JIANG D, ZHANG D, LI X, et al. Fluoride-salt-cooled high-temperature reactors: Review of historical milestones, research status, challenges, and outlook[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112345.

3 FORSBERG C. Molten-Salt-Cooled Advanced High-Temperature Reactor for Production of Hydrogen and Electricity[J/OL]. Nuclear Technology, 2003, 144.

4 FRATONI M. Development and applications of methodologies for the neutronic design of the Pebble Bed Advanced High Temperature Reactor (PB-AHTR)[D]. ProQuest Dissertations and Theses. 2008.

5 GREENE S R, GEHIN J C, HOLCOMB D E, et al. Pre-conceptual design of a fluoride-salt-cooled small modular advanced high-temperature reactor (SmAHTR)[J]. Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2010/199, 2010.

6 江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 未来先进核裂变能——TMSR 核能系统[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 366-374.

7 ANDREADES C, CISNEROS A, CHOI J K, et al. Technical Description of the “Mark 1” Pebble-Bed Fluoride-Salt-Cooled High-Temperature Reactor (PB-FHR) Power Plant[M]. 2014.

8 MACDONALD R. Investigation and design of a secure, transportable fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (TFHR) for isolated locations[J]. 2015.

9 ZHANG D, LI X, JIANG D, et al. Fluoride-Salt-cooled high-Temperature Advanced Reactor (FuSTAR): An integrated nuclear-based energy production and conversion system[J]. Energy, 2024, 290: 130048.

10 张大林, 秦浩, 王式保, 等. 固有安全一体化小型氟盐冷却高温堆初步概念设计研究[J]. 中国基础科学, 2021, 23(04): 15-20.

11 ZHOU X, ZHANG D, LI X, et al. Preliminary conceptual design with neutronics and thermal-hydraulics assessments of FuSTAR[J/OL]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 197: 110262.

12 LI X, ZHANG D, LI X, et al. Study on iterative algorithm of full plate cross-flow and counter-flow printed circuit heat exchanger for fluoride-salt-cooled high-temperature advanced reactor[J]. International Journal of Advanced Nuclear Reactor Design and Technology, 2023, 5(2): 86-96.

13 LI X, ZHANG D, LV X, et al. Simulation and design of passive residual heat removal system for Fluoride-Salt-cooled high-Temperature Advanced reactor (FuSTAR)[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120765.

14 张鹏辉, 卢国庆, 陈荣华, 等. 可视化交互式核动力系统模拟平台 VITARS 的开发与验证[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(2): 313-320.

15 LIU L, ZHANG D, SONG J, et al. Modification and application of Relap5 Mod3 code to several types of nonwater-cooled advanced nuclear reactors[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(1): 221-235.

16 LIU L, ZHANG D, YAN Q, et al. RELAP5 MOD3.2 modification and application to the transient analysis of a fluoride-salt-cooled high-temperature reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 101: 504-515.

17 徐博. 小型模块化固态燃料熔盐堆 TMSR-SF2 的热工水力设计与安全事故分析[D]. 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2017[2024-04-18].

18 张建民. 核反应堆控制[M]. 核反应堆控制, 2002.

19 张薇薇, 何正熙, 万雪松, 等. 小型模块化反应堆控制方法综述[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2024, 61(2): 7-18.

20 张力玮, 段天英, 贾玉文. 400 MW 低温供热堆功率调节系统仿真研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(12): 2181-2187.